

高山町家の構造的長を生かした耐震補強設計法の開発

Development of Seismic Reinforcement Design Method for Traditional Wooden Houses by Taking Advantage of Structural Features in Takayama Area

佐藤英佑¹・向坊恭介²・鈴木祥之³

Eisuke Sato, Kyosuke Mukaibo and Yoshiyuki Suzuki

¹立命館大学客員研究員, 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

²木四郎建築設計室 (〒605-0811 京都市東山区小松町 148-1)

Staff, Kishirou Architectural Design

³立命館大学教授, 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

In Takayama City, a large number of traditional wooden houses still exist and make regionally distinctive townscape. They are called “*Takayama-machiya*”. To clarify structural features of *Takayama-machiya* houses, structural detailed investigations were carried out. Based on the investigations, it is pointed out that traditional wooden houses have some problems on seismic performance and need some reinforcements. Therefore, it is necessary to establish a seismic reinforcement design method suitable for *Takayama-machiya* houses. In this paper, a case study of seismic reinforcement design is conducted for a typical two-storied *Takayama-machiya*. The proposed seismic reinforcement design method is useful and reasonable by taking advantage of structural features on traditional wooden houses.

Keywords : *Traditional wooden houses, seismic reinforcement method, seismic performance, Takayama-machiya*

1. はじめに

岐阜県高山市は、重要伝統建造物保存地区に指定されている三町および下二之町大新町をはじめ市内に伝統構法木造建築物が多く現存している。これら建築物は地域特有の町並み景観を形成するとともに歴史的・文化財として高い価値があり、保存継承することは重要である。このような観点から詳細な構造調査を実施した結果、多くの建築物では耐震安全性、耐久性などの問題を抱えており、劣化した木部補修を含む耐震改修が急務とされた。そこで、高山市独自の高山市伝統構法木造建築物耐震化マニュアル¹⁾が作成された。

現在、木造建築物は在来工法などを対象とした壁量計算による耐力重視の耐震設計や耐震補強がなされる場合が多い。一方、伝統構法による木造建築物は高い変形性能を有しており、この変形性能を生かした耐震設計、耐震補強が合理的であり、かつ有効である。そのため、伝統構法木造建築物が本来有している高い変形性能を生かした限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計マニュアル²⁾があるが、設計用復元力や地震応答計算など計算を容易にするために簡略化しており、高山町家特有の構造的長を考慮できない。

本論文では、限界耐力計算を改良した近似応答計算による耐震性能評価法を導入することで各層の応答値の精度を高め、高山町家が持つ構造的長モデル化し、耐震性能を精度よく評価可能とする耐震補強設計法を開発した。ここでは、高山町家として典型的な一列型町家を対象にして、多雪区域である高山市の積雪荷重を考慮するとともに、1階と2階の応答変位のバランスや偏心率を改善する耐震補強設計の事例を示す。

2. 高山町家の意匠的・構造的長

高山町家は切妻造り平入りの総二階建てで、屋根は金属板葺きで屋根勾配は緩く、軒の出は深く前面に板

止めを備え、一階正面は、一般的に入り口の大戸や出格子付きの腰付障子が設けられ、上部に出の小さい小庇を付ける。2階の柱間には板連子又は板格子をはめ、一部を顕し貫付きの土壁とする。このような町家が街路沿いに建ち並ぶことで町並みに統一感のある外観構成となっており、景観的価値を生みだしている。

平面形状での特徴として「どじ（通り土間）」と言われる玄関から裏へと土間が通り、その「どじ」に沿って部屋が正面から裏へ1列に配置する一列型、2列配置の二列型、数は少ないが3列の三列型もある。2階は吹き抜を挟み、みせ2階と奥座敷が設けられている。

中央部の「おえ」、「だいどこ」「どじ」の上の小屋組を顕しにした吹き抜けの大空間にして、高窓から光を取り入れ、柱や梁等の豪壮かつ整然とした構造美を見せる（写真1）。建築意匠的および建築技術的な建築的価値は、外観よりもむしろ内部の吹き抜けの大空間にあり、町家の立面意匠を残すことは景観保存上重要であるが、この吹き抜け大空間を残すことも大きな意義がある。

構造的には、高山町家は通り沿いに連なり、隣家との距離がほとんどないため、張り間方向の妻壁は概ね全面壁である。一方、けた行方向には、2階吹き抜け空間の周囲以外には壁などの耐震要素が少なく、特に1階には壁がほとんどない耐震上の弱点を有している。主要な耐震要素は、伝統的な土壁や板壁と差鴨居、貫など柱一横架材であり、筋かいなどの斜材は使われていない。

土壁の構造的な特徴として、小舞は竹ではなく、ススキが大半であるが、一般的な竹小舞仕様とは耐震性能はほとんど変わらないことが実験で確認されている³⁾。屋内の間仕切り壁では、両面中塗り仕上げ、もしくは聚楽風の上塗り仕上げで、壁厚は55mm～65mmである。外壁（妻壁）では、妻壁の外壁側は裏返しや中塗りなどをせず外装材だけであることが多い、壁厚は40mm～50mm程度である。

2階正面や2階吹き抜け空間の周囲などには、貫が土壁の下地材としてではなく、顕しで用いられており（写真1）、これは高山市の伝統構法木造建築物の意匠上の特徴のひとつと言える。顕しの貫は厚さ30mm、せい115mm～120mm程度である。貫の厚さが30mmあるので、柱を貫通する通し貫である場合には、復元力が期待できる。

土壁と板壁を複合した特徴的な壁が、「どじ」の外壁側の壁に多く見られる（写真2）。板壁単体の使用例はほとんど無く、写真2のように土壁（垂れ壁）の下部に板壁（腰壁）となる複合壁である。板壁は薄板を使用しており、構造上の耐力はない。板壁部の内部は裏返しのない土壁の場合もみられるが、貫のみや貫・小舞下地のみで土壁はないものが多い。

主要な仕口接合部は、解体材および現地調査、地元の棟梁からの聞き取りによれば、通し貫、小根ほぞ込み栓打ちまたは追入小根ほぞ車知栓打ち、長ほぞなどである。

3. 高山町家の耐震診断・耐震補強事例

高山町家として一般的な一列型町家である宮地家住宅（高山市指定有形文化財）（写真3）の耐震診断、耐震補強設計の事例を示す。耐震性能の評価法として、限界耐力計算を改良した近似応答計算を用いて、高山町家の構造的長を生かし、多雪区域である高山市の積雪荷重を考慮して耐震診断、耐震補強設計を行う。

3.1 耐震診断

(1) 構造概要

図1に現況の構造平面図を示し、図2に構造軸組図を示す。金属板葺き切妻平入りの2階建てで、X方向（けた行方向）約11m×Y



写真1 大きな吹き抜け空間と顕しの貫を有する土壁（宮地家）



写真2 土壁と板壁を複合した特徴的な壁（宮地家）



写真3 宮地家住宅の外観

方向（張り間方向）約6.1mの一系列の町家である。

平面図および軸組図には各階の主たる構造要素である壁の仕様および各構面の構造要素とみなす横架材および柱ほぞ位置を示す。当該建築物はX方向両妻面に全面壁が配置されているが、Y方向の構造要素が少ない。表1に構造階高および床面積を示し、表2に地震応答計算に用いる建築物重量を示す。各層の重量は建築物重量を図3に示す領域で配分した。2階の構造階高は軒高の平均とした。固定荷重 G は当該建築物での実測調査、日本建築学会荷重指針⁴⁾、建築基準法（以降、建基法）施行令第84条などに基づいて実況に応じて単位重量を設定した。積載荷重 P は建基法施行令第85条に従い、単位重量 $600\text{N}/\text{mm}^2$ とした。積雪荷重 S は建基法施行令第86条に従い、垂直積雪量 120cm 、単位重量 $30\text{N}/\text{cm}/\text{mm}^2$ とし、地震時の積雪荷重は $0.35S$ とした。

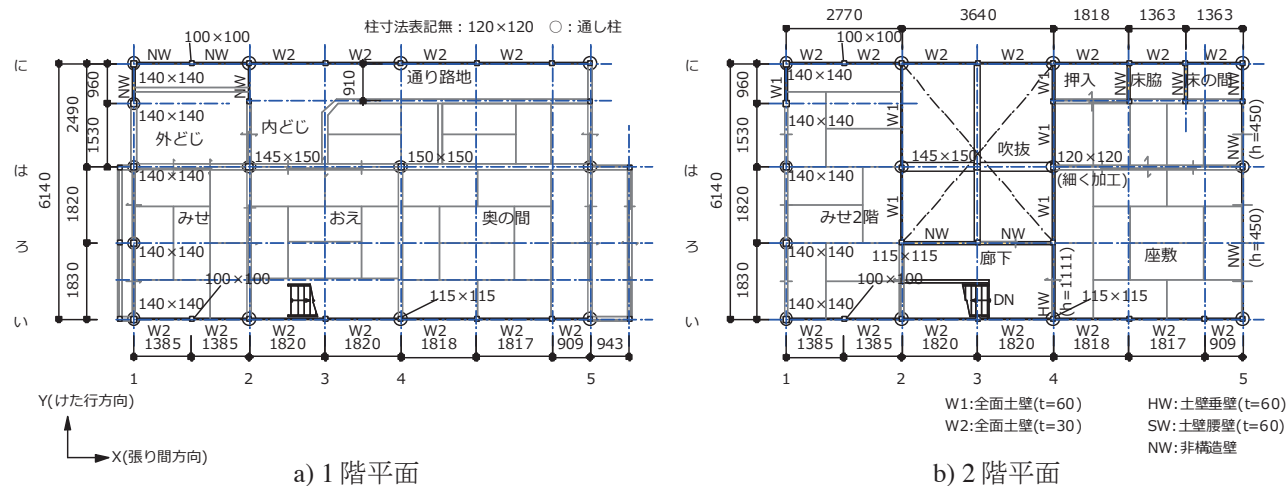


図1 構造平面図（現況）

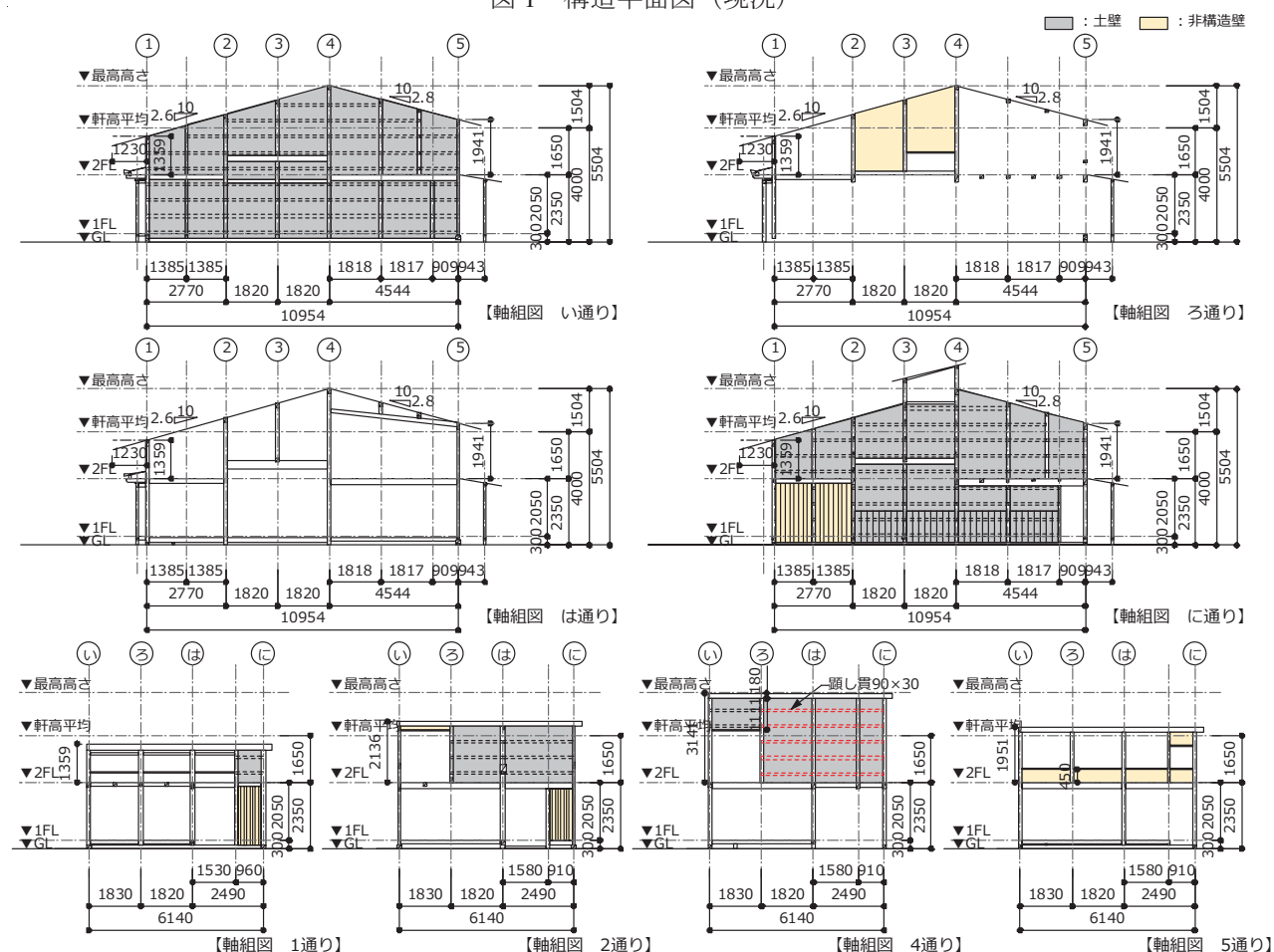


図2 構造軸組図（現況）

復元力特性算定に用いる各構造要素の復元力モデルは文献2)に従い求めた。

- ① 土壁：両妻側の土壁は裏返し無しの片面塗りのため、壁厚40mmに対し構造要素として有効な壁厚を30mmとして算定した。なお、に通りの板壁の内部に土壁があるため全面壁として復元力を算定した。X方向の土壁は壁厚60mmとして復元力を算定した。ろ通り2階の土壁は、左右ともに支持柱が無く、下部梁の端部の拘束力が小さいと推測されるため、耐震要素とせず、重量のみ加算する（壁厚40mm）。
- ② 柱ほぞ：1、5通りの柱ほぞのみ長ほぞ（強軸方向：Y方向）として評価し、その他の柱ほぞは加算しない。
- ③ 横架材ほぞ：柱－横架材仕口は、通しほぞ車知栓打ちと仮定して加算する。
- ④ 顕し貫：2階4通り-ろ～は通りの土壁面の顕し貫は、土壁内の貫に比べて断面が大きく(30mm×90mm)、めり込みによる抵抗が期待できる。ろ通り、は通り両端大入れの通し貫として復元力を算定した⁵⁾。

図4に復元力特性を示す。X方向Y方向ともに、2層に比べて1層の水平耐力が低く、両方向で1層先行降伏となる可能性が高く、特にY方向でその傾向が顕著である。

	階高[m]	床面積[m ²]	備考
2階	1.665	51.57	吹抜け部 15.69m ²
1階	2.350	71.98	土間部 15.45m ²

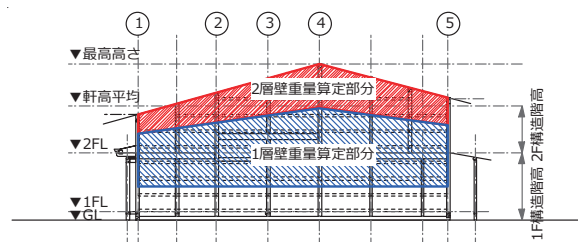


図 3 壁重量の振り分け

表 2 地震応答計算用建築物重量（現況）

	固定荷重 G (kN)	積載荷重 P (kN)	積雪荷重0.35 S 積雪1.2m想定(kN)	地震応答計算用建物重量(kN)	
				積雪無 $G+P$	積雪1.2m $G+P+0.35S$
2層	66.3	0.0	96.3	66.3	162.6
1層	68.1	30.9	3.3	99.0	102.3
2層+1層	134.4	30.9	99.6	165.3	264.9

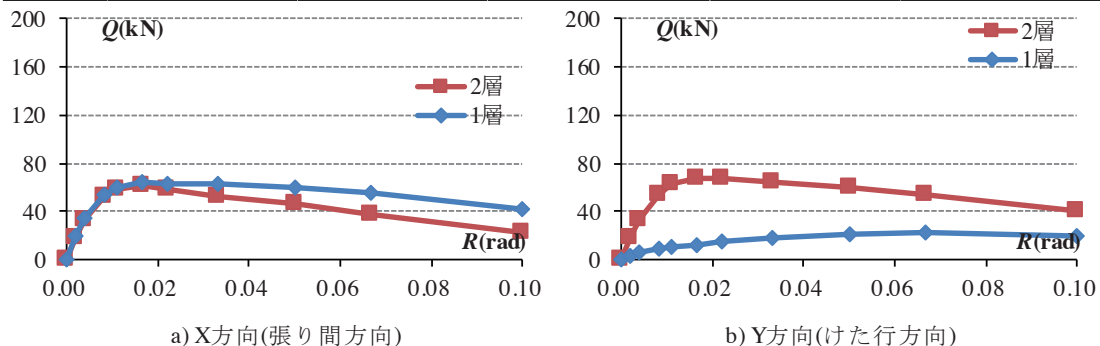


図 4 復元力特性（現況）

(2) 近似応答計算結果

表3、図5に近似応答計算の結果を示す。クライテリアの検定に用いる損傷限界変形角（稀に発生する地震動に対する応答許容値）を1/90rad、安全限界変形角（極めて稀に発生する地震動に対する応答許容値）を1/20rad（積雪時：1/15rad）とした。近似応答計算に用いる入力加速度は平成12年建設省告示1461号の加速度応答スペクトルを用いた。地盤増幅率は同1457号に基づき設定し、防災科学技術研究所により公開された表層30mの平均S波速度を基に設定した。高山市伝統建造物群保存地区の表層30mの平均S波速度は約400m/sで第1種地盤に近く、第1種と第2種の間値（第1.5種）とした。地域係数 $Z = 1.0$ 、調整係数 $p = 0.85$ 、 $q = 1.0$ とした。近似応答計算は1階の変形を各ステップの基準とし、同ステップにおける2階の変形と剛性が一致するように、収斂計算を行った。減衰評価は各階ごとに減衰を求め、モードエネルギーで重みづけをしたモード減衰で評価した。その際、損傷限界角以下の変形時には履歴吸収エネルギーを0として減衰定数を算定した。表3中の応答値は、前述図4の復元力特性から建築物の自重による水平力の見かけ上の耐力低下（ $P-\Delta$ 効果による耐力低下）を考慮した復元力特性を用いた近似応答計算の結果を示している。X方向、Y方向ともに1階が大きな応答値を示しており、稀に発生する地震動時にY方向1階が設計クライテリアを大きく上回り、積

表 3 近似応答計算結果（現況）

方向	$P-\Delta$ 効果による 付加曲げ成分考慮	稀に発生する地震動時		極めて稀に発生する地震動時	
		積雪なし	積雪1.2m	積雪なし	積雪1.2m
X方向 (張り間方向)	等価固有周期 $T_{eq}(\text{sec.})$	0.523	0.769	***	4.634
	減衰定数 $h=h_{eq}+h_0$ (%)	5.00	5.00	***	15.15
	加速度増幅率 G_s	1.50	1.69	***	1.69
	1自由度系応答変形角(rad.)	1/ 226	1/ 125	1/ ***	1/ 7.5
	2階応答変形角(rad.)	1/ 539	1/ 201	1/ ***	1/ 3.5
	1階応答変形角(rad.)	1/ 190	1/ 105	1/ ***	1/ 30.4
クライテリアの検定		OK	OK	NG	NG
Y方向 (けた行方向)	等価固有周期 $T_{eq}(\text{sec.})$	1.797	***	***	***
	減衰定数 $h=h_{eq}+h_0$ (%)	9.19	***	***	***
	加速度増幅率 G_s	1.69	***	***	***
	1自由度系応答変形角(rad.)	1/ 63	1/ ***	1/ ***	1/ ***
	2階応答変形角(rad.)	1/ 2183	1/ ***	1/ ***	1/ ***
	1階応答変形角(rad.)	1/ 49	1/ ***	1/ ***	1/ ***
クライテリアの検定		NG	NG	NG	NG

※応答変形角の***は応答値なしを示す

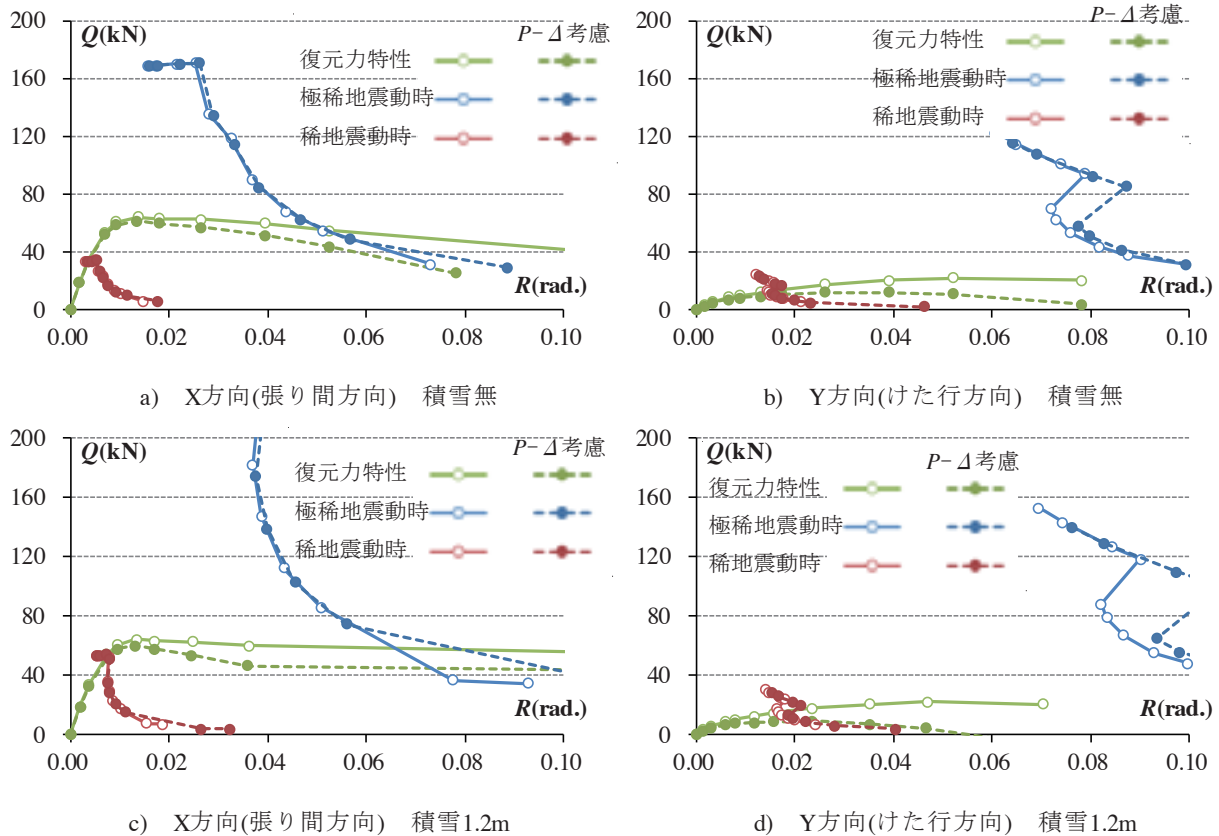


図 5 近似応答計算結果（現況）

雪時に層崩壊を生じる恐れがある。極めて稀に発生する地震動時は応答値なしで、倒壊の危険性がある。

3.2 耐震補強の検討

(1) 耐震補強計画概要

図6、7に耐震補強後の構造平面図および構造軸組図を示す。X方向、Y方向ともに耐震補強として乾式土壁パネルまたは板壁を増設する。乾式土壁パネルは土壁に比べて単位面積重量が小さく、最大耐力以降の荷重低下が少なく、靱性に優れた耐震要素である⁶⁾。当該建築物は土壁が主たる構造要素であり、最大耐力以降の荷重低下が大きいため、妻面の壁の一部を土壁から乾式土壁パネルに変更した。また、梁桁スパンが大きく鉛直荷重支持が厳しいと思われる箇所へ柱を増設する。表4に地震応答計算に用いる耐震補強後の建築

物重量を示す。固定荷重 G は土壁の一部を乾式土壁パネルに変更することにより耐震補強前と比較して建築物全体で約5%の重量低減となった。

図8に耐震補強後の復元力特性を示す。復元力特性は前述の①～④の耐震補強要素に加えて、下記の要素の復元力を加算して求めた。

- ⑤ 乾式土壁パネルを用いた補強壁：乾式土壁パネルは受け材仕様を基本とし、文献6)で示された実験値に基づいて復元力を算定する。2階4通りの乾式土壁パネルは頭し貫仕様とし、受け材使用の復元力を75%に低減することで復元力を算定した。パネル厚さは片面張：26mm、両面張：52mmとした。
- ⑥ 補強板壁：補強板壁は、板厚30mmの両面貼り、吸付棧とし、実験値に基づいて復元力を設定する。板壁の復元力特性は文献1)を基に、壁長さに応じて補正を行った。

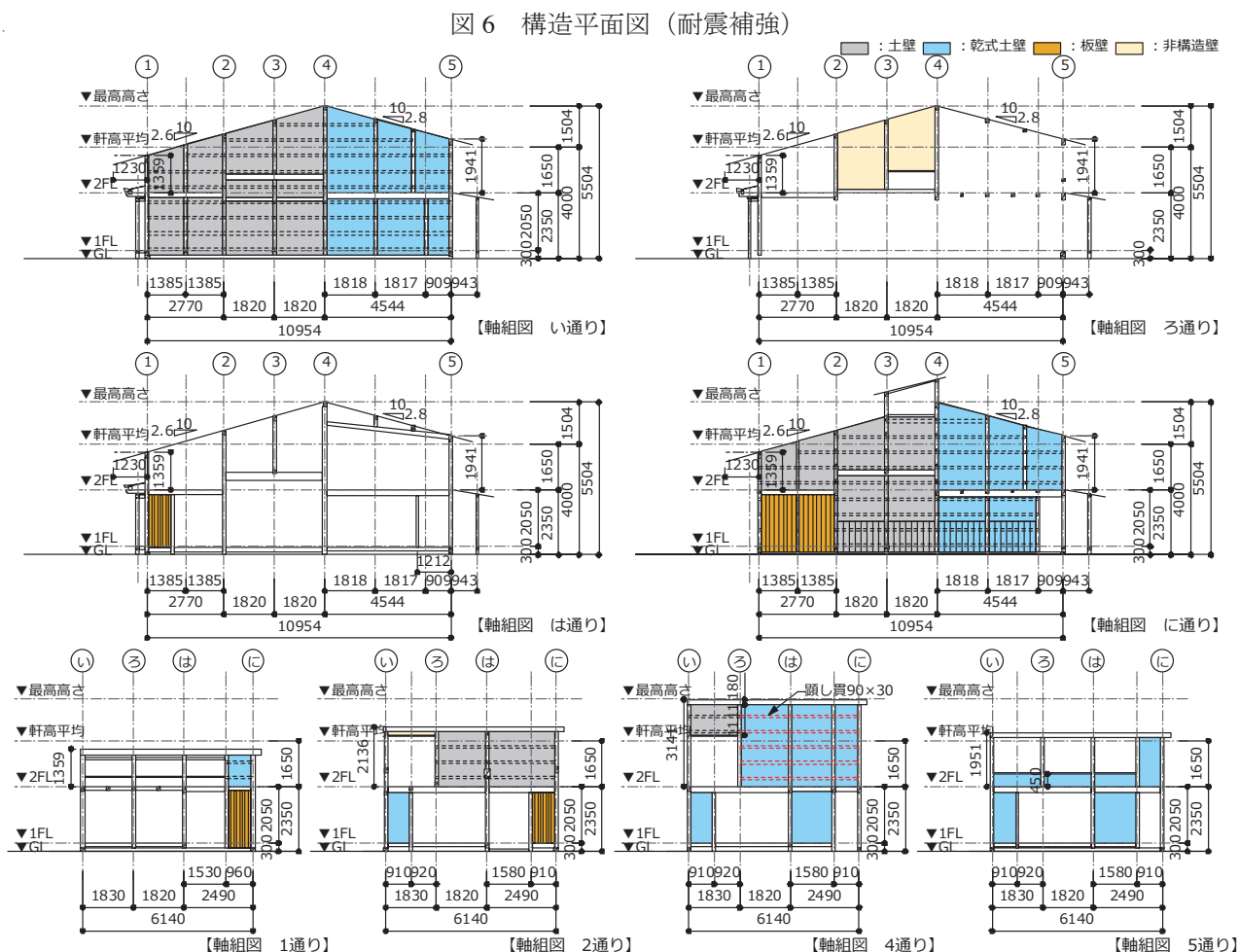
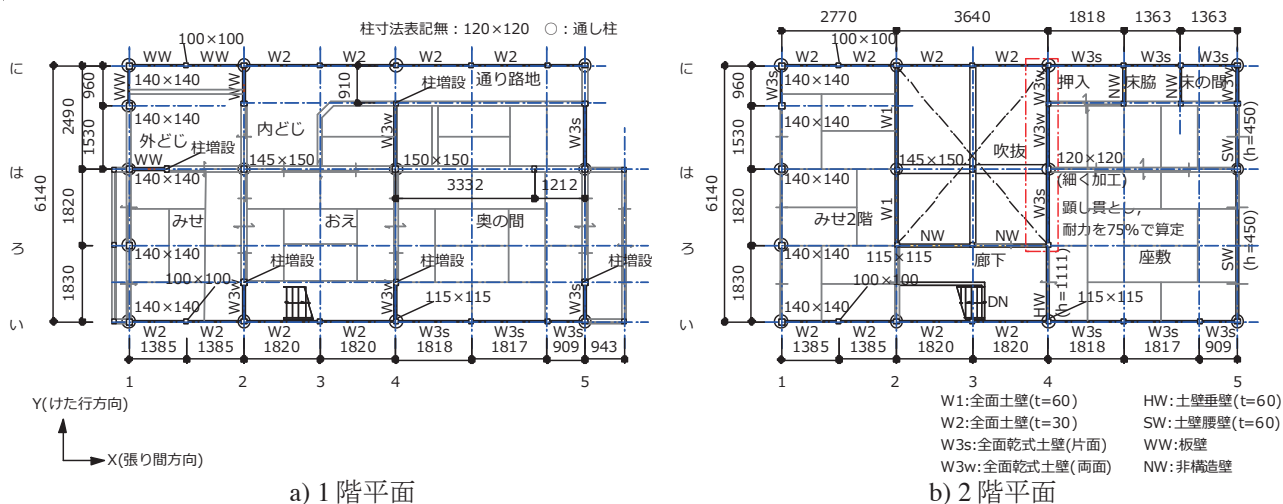


図7 構造軸組図 (耐震補強)

- ⑦ 補強小壁：乾式土壁パネルによる補強を想定するが復元力特性は土壁60mm厚と同等として評価する。
- ⑧ 増設柱の柱ほぞ：増設柱のほぞは加算しない。
- ⑨ 横架材ほぞ：足固めを取替または増設する箇所は、雇いほぞ車知栓打ちと仮定して加算する。

耐震補強要素の追加により、現況と比較して最大耐力が2～4倍上昇し、最大耐力以降の靱性が向上した。偏心率は補強前の最大0.24（1階張り間方向）から補強後の最大0.07（2階張り間方向）に改善された。

(2) 近似応答計算結果

表5、図9に近似応答計算の結果を示す。耐震診断と同様、クライテリアの検定に用いる損傷限界変形角（稀に発生する地震動に対する応答許容値）を1/90rad、安全限界変形角（極めて稀に発生する地震動に対する応答許容値）を1/20rad（積雪時：1/15rad）とした。耐震要素を追加することにより応答値は各方向、積雪の有無にかかわらずクライテリアを満足している。また、Y方向の1階に多く耐震補強要素を追加したことによりX、Y方向の応答のバランスも改善され、1階と2階の応答値のバランスも改善された。既存の耐震要素の一部を乾式土壁パネル耐震壁とすることで大変形時の靱性を確保し、高山町家の特徴である吹抜け等の開放的な空間を残した耐震補強を可能とした。

表4 地震応答計算用建築物重量（耐震補強）

	固定荷重 G (kN)	積載荷重 P (kN)	積雪荷重0.35 S 積雪1.2m想定(kN)	地震応答計算用建物重量(kN)	
				積雪無 $G+P$	積雪1.2m $G+P+0.35S$
2層	61.9	0.0	96.3	61.9	158.2
1層	65.9	30.9	3.3	96.9	100.2
2層+1層	127.8	30.9	99.6	158.8	258.4

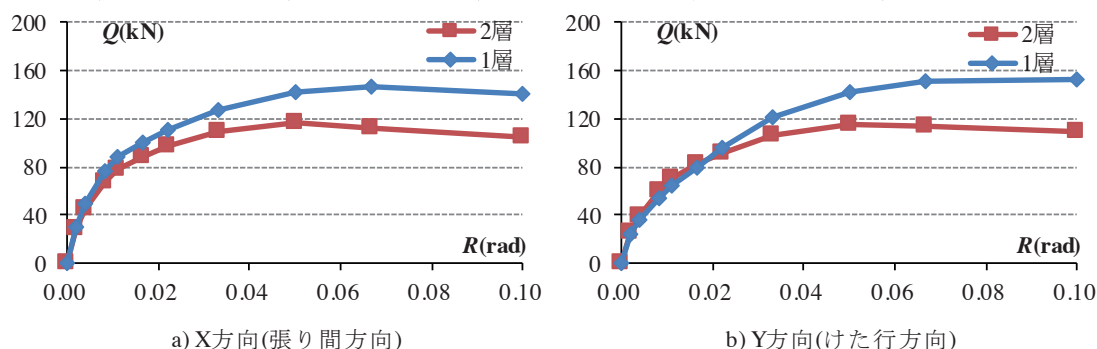


図8 復元力特性（耐震補強）

表5 近似応答計算結果（耐震補強）

方向	$P-\Delta$ 効果による 付加曲げ成分考慮	稀に発生する地震動時		極めて稀に発生する地震動時	
		積雪なし	積雪1.2m	積雪なし	積雪1.2m
X方向 (張り間方向)	等価固有周期 T_{eq} (sec.)	0.379	0.596	0.656	1.040
	減衰定数 $h=h_{eq}+h_0$ (%)	5.00	5.00	11.43	12.45
	加速度増幅率 G_s	1.50	1.50	1.54	1.69
	1自由度系応答変形角(rad.)	1/ 428	1/ 196	1/ 40.3	1/ 27.5
	2階応答変形角(rad.)	1/ 970	1/ 260	1/ 205.8	1/ 66.1
	1階応答変形角(rad.)	1/ 364	1/ 175	1/ 32.7	1/ 21.6
クライテリアの検定		OK	OK	OK	OK
Y方向 (けた行方向)	等価固有周期 T_{eq} (sec.)	0.441	0.726	0.764	1.056
	減衰定数 $h=h_{eq}+h_0$ (%)	5.00	5.00	11.83	11.86
	加速度増幅率 G_s	1.50	1.69	1.69	1.69
	1自由度系応答変形角(rad.)	1/ 315	1/ 131	1/ 32.1	1/ 26.5
	2階応答変形角(rad.)	1/ 860	1/ 252	1/ 174.4	1/ 52.3
	1階応答変形角(rad.)	1/ 263	1/ 107	1/ 26.0	1/ 21.5
クライテリアの検定		OK	OK	OK	OK

4. おわりに

岐阜県高山市に現存する伝統構法木造建築物である町家について、構造詳細調査によって構造的長を把

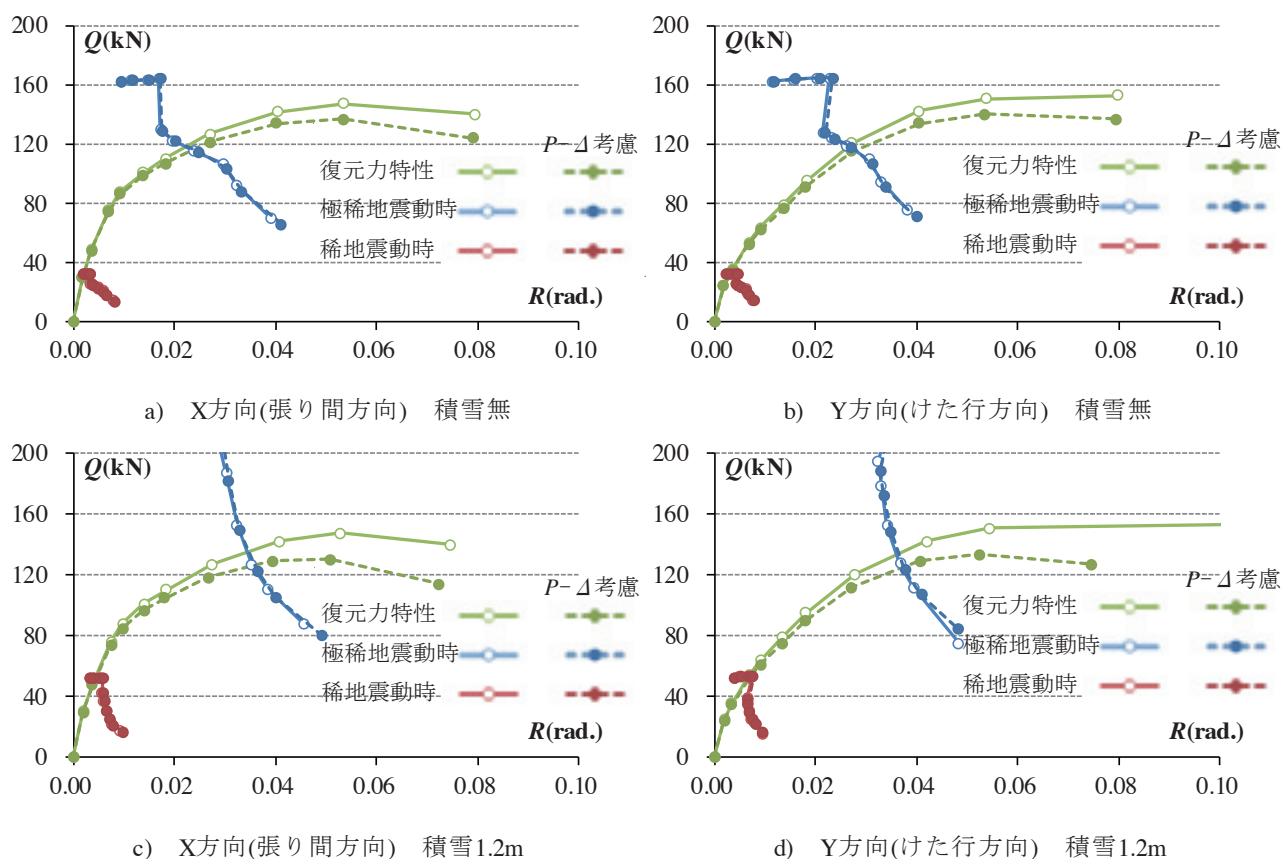


図9 近似応答計算結果（耐震補強）

握した。張り間方向には両側の妻壁が全面的に土壁であり、一方、けた行方向には、2階吹き抜け空間の周囲以外には壁などの耐震要素が少なく、特に1階には壁がほとんどない。これは京町家など多くの町家と同様に耐震上の弱点となっている。極めて稀に発生する地震動時には倒壊の危険性がある。

屋根は金属板葺きであり、また土壁の厚さが小さいために、建築物重量は軽いが、多雪区域である高山市の積雪荷重を考慮した場合と考慮しない場合で、建築物重量は大きく異なる。そのため、耐震補強設計では、積雪の有無とともに1階と2階の耐力、応答のバランスを改善し、さらに耐震性能が向上するように変形性能の高い乾式土壁や板壁などの耐震要素を追加・配置した。

中央部の吹き抜けの大空間は高山町家の大きな構造的特長であり、意匠的な特長ともなっているため、耐震補強では、町家の立面意匠とともに吹き抜け大空間の構造を損なうことのないように配慮した。

本研究で提案した構造的長を生かした耐震補強設計法は、高山市の重要伝統建造物保存地区などの伝統構法木造建築物の耐震補強に有用であり、今後、具体的な事例に実装するなど活用するとともに耐震改修の促進を図る。

謝辞：本研究は、高山市をはじめ高山市伝統構法木造建築物耐震化マニュアル作成検討委員会、飛騨高山伝統構法木造建築物研究会の支援のもとに実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 高山市伝統構法木造建築物耐震化マニュアル作成検討委員会：「高山市伝統構法木造建築物耐震化マニュアル」,2014.3
- 2) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法,学芸出版社,2004.3
- 3) 村石一明・田中邦明・森迫清貴：飛騨高山伝統構法土壁の繰り返し載荷実験,構造工学論文集,Vol.60B,pp.357-362,2014. 3.
- 4) 日本建築学会：「建築物荷重指針・同解説」,2015.3.
- 5) 中治弘行・鈴木祥之：頭しの貫がある土壁の復元力特性,第9回歴史都市防災シンポジウムに投稿中
- 6) 杉山亮太・鈴木祥之・後藤正美・村上博：乾式土壁パネルを用いた木造軸組耐力壁の開発,日本建築学会技術報告集,第24号,pp.125-130,2006.12.